

DOI : 10.16285/j.rsm.2016.S1.011

预制横缝条件下水力裂缝的起裂和扩展

王 磊¹, 杨春和^{1,2}, 侯振坤², 郭印同¹, 魏元龙², 蒋廷学³

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;
2. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044;
3. 中国石油化工股份有限公司 石油工程技术研究院, 北京 100101)

摘 要:针对高角度天然裂缝发育地层中的水平井水力压裂问题,开展了水力裂缝自天然裂缝处起裂扩展的理论和试验研究。尝试将天然裂缝简化为与井筒轴线垂直的横向裂缝,基于线弹性断裂力学理论和最大拉应力准则,给出了水力裂缝起裂压力和扩展过程中应力强度因子的计算方法。利用预制横缝模拟高角度天然裂缝,开展了室内水力压裂试验,对水力裂缝的扩展形态和起裂压力进行了研究。理论计算表明,(1)水力裂缝自预制横缝端部起裂后,扩展距离超过 1 倍的预制横缝端部半径时可将预制横缝和水力裂缝合并起来,整体视作一条横向裂缝来计算应力强度因子;(2)水力裂缝尖端距井壁处的距离大于 4 倍的井筒半径时,应力强度因子的计算可忽略井筒的影响,近似采用硬币形裂缝的计算公式。试验研究发现,(1)水力裂缝在预制横缝端部起裂并扩展,形成与井筒轴线垂直的横向裂缝,裂缝的扩展呈现出 型断裂的特点,形态近似呈圆形,未发现与井筒轴线平行的纵向裂缝的起裂和扩展;(2)排量对破裂净压力和起裂净压力有重要影响,大排量会导致较高的破裂净压力和起裂净压力,在大、小两种排量下起裂净压力的离散性均较小,计算得到的 K 临界断裂值的离散性也较小。研究结果可为改善裂缝发育储层的近井裂缝形态提供指导,也可为煤矿开采中预制横向切槽的水力压裂设计提供参考。

关键词:水平井;水力压裂;天然裂缝;横向裂缝;裂缝起裂;裂缝扩展;起裂净压力

中图分类号: TE 241

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016) 增 1 - 0088 - 07

Initiation and propagation of hydraulic fractures under the condition of prefabricated transverse fracture

WANG Lei¹, YANG Chun-he^{1,2}, HOU Zhen-kun², GUO Yin-tong¹, WEI Yuan-long², JIANG Ting-xue³

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;
2. State Key Laboratory for Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
3. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, China Petroleum and chemical Co., Beijing 100101, China)

Abstract: Aiming at the problem of horizontal well hydraulic fracturing in formation with dip angle natural fractures, theoretical and experimental studies on the initiation and propagation of hydro-fracture from natural fracture are carried out. Simplifying the natural fracture as a transverse fracture perpendicular to the well axis, the method of calculating initiation pressure and stress intensity factor (SIF) are given, based on the theory of linear elastic fracture mechanics and the maximum stress criterion. Meanwhile, using a prefabricated transverse fracture to simulate natural fracture, laboratory hydraulic fracturing test is carried out to investigate the fracture geometry and initiation pressure. Theoretical calculation shows that: (1) after initiating from the prefabricated transverse fracture tip, the prefabricated transverse fracture and the fracture can be regarded as a whole and treated as a transverse fracture to calculate SIF when the fracture propagates longer than the radius of the notch tip. (2) when the distance between the fracture tip and the wellbore wall is longer than four times of the wellbore radius, the wellbore effect can be neglected and SIF equation for penny-shaped crack can approximately be used. Experimental studies show that (1) hydraulic fracture initiates at the tip of the prefabricated transverse fracture and propagates to form a transverse fracture orthogonal to the wellbore; fracture propagation shows the feature of model fracturing; the fracture geometry is near round; no longitudinal fracture is observed. (2) pumping rate has a significant effect on the net breakdown pressure and net initiation pressure with larger pumping rate leading to higher net pressures; the discreteness of net initiation pressure and calculated critical fracturing value K are small under both large and small pumping rate

收稿日期: 2015-08-05

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51574218); 中国科学院战略性先导科技专项 (B类) 子课题名称 (No. XDB10040202); 中国石化科技攻关项目 (No. P14091); 国家高技术研究发展计划 ("863") 项目 (No. 2013AA064800)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51574218), the Chinese Academy of Sciences Strategic Leader Science and Technology Project (Type B) Sub-project (XDB10040202), the Sinopec Scientific and Technological Research Project (P14091) and the National High-tech R & D Program (863 Program) (2013AA064800).

第一作者简介: 王磊, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事页岩气水力压裂开采等方面的研究。E-mail: jack1906@hotmail.com

conditions. Research results can provide guidance for improving near wellbore fracture geometry of naturally fractured reservoir and reference for designing hydraulic fracturing with prefabricated transverse fracture in coal mining.

Keywords: horizontal wellbore; hydraulic fracturing; natural fracture; transverse fracture; fracture initiation; fracture propagation; net initiation pressure

1 引言

水平钻井和水力压裂是开发致密气藏的两大核心技术^[1]。对于裂缝不发育的储层，水平井无论是采用裸眼完井，还是套管射孔完井，井壁处可能同时存在沿着井筒轴线的纵向裂缝和与井筒轴线垂直的横向裂缝，近井裂缝形态比较复杂，对此已有许多现场^[2-3]和室内试验^[4-6]研究予以证实。然而，当水平井钻遇垂向或高角度天然裂缝发育的地层时，在这类地层中进行水力压裂，极易引起水力裂缝在原有天然裂缝基础上的起裂和扩展，又由于水平井的走向大都沿着水平最小主应力方向，起裂后的水力裂缝将很可能沿着天然裂缝所在的平面继续扩展，形成与井筒垂直的横向裂缝。

在天然裂缝对水力裂缝的影响方面，国内外学者开展了很多的试验和理论研究。Warpinski 等^[7]通过开展矿场试验以及室内试验，认为不连续地质界面（节理、断层、层理面等）能够显著影响水力裂缝的形态。Potluri 等^[8]借鉴 Warpinski 的方法，系统地研究了天然裂缝对水力裂缝扩展的影响。周健等^[9]采用理论分析、试验验证和算例分析，研究了裂缝性储层水力压裂过程中天然裂缝张开和剪切破坏机制。陈勉^[10]从岩石断裂动力学的角度出发，采用力学分析和数值模拟相结合的方法，研究水力裂缝在天然裂缝处的转向扩展条件，分析裂缝转向扩展形态变化，并利用现场实例验证了模型的适用性。程万等^[11]基于对三维空间下水力裂缝尖端应力场以及作用在天然裂缝面上的应力场的分析，建立了水力裂缝穿透天然裂缝的判别准则，利用大尺寸真三轴水力压裂实验模拟系统，试验研究了不同产状天然裂缝、地应力对水力裂缝扩展行为的影响。

以往的研究主要集中于水力裂缝从井壁处起裂后，在延伸过程中与天然裂缝相遇时的行为对水力裂缝在已有天然裂缝基础上的起裂和扩展这一情况则研究较少。此外，水力裂缝在天然裂缝基础上的起裂也将与在井周围岩相对完整情况下的起裂存在很大差异，影响到近井区域的裂缝形态，需要对此进行专门研究。

本文将高角度天然裂缝简化为与井筒轴线垂直的预制横向裂缝，考虑水力裂缝在预制横缝基础上起裂和扩展的情况，给出了线弹性、均质各向同

性介质中裂缝起裂压力和扩展过程应力强度因子的计算方法，利用人工制备试样开展了预制横缝条件下的室内水力压裂试验，研究了水力裂缝的形态，结合裂缝起裂净压力，计算得到试验条件下的型断裂临界值。研究结果对于改善裂缝发育储层压裂水平井的近井裂缝形态、提高压裂效果具有一定的指导意义，也可为煤矿开采中预制横向切槽^[12]的水力压裂设计提供参考。

2 理论计算模型

2.1 问题描述

在无限大的线弹性、各向同性介质中有一个圆柱形井筒，井壁处存在一条与井筒轴线垂直的预制横向裂缝，裂缝尖端的形状假设为半圆形，水力裂缝从预制横缝的尖端处起裂，如图 1 所示。

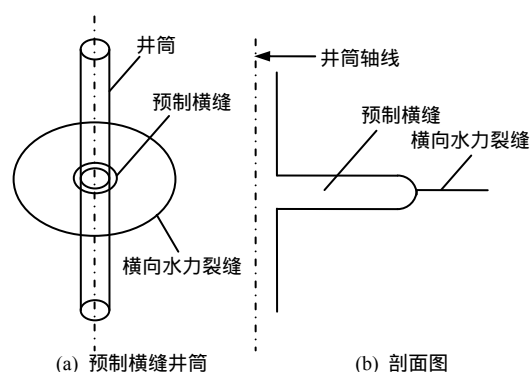


图 1 模型示意图

Fig.1 Sketch of model

水力裂缝的起裂扩展分为 3 个阶段，第一个阶段：水力裂缝在预制横缝的端部处起裂并扩展一段距离，此过程需要考虑预制横缝及其半圆形的尖端对裂缝起裂和扩展的影响；第二阶段：裂缝扩展到较远距离，此时预制横缝的影响可以忽略不计，但水力裂缝的扩展还要受到井筒的影响，问题简化为考虑井筒的横向水力裂缝的扩展，计算模型见图 2(a)；第三阶段：裂缝扩展到更远的距离，井筒半径相对于横向裂缝的扩展距离可以忽略不计，问题进一步简化为经典的硬币形裂缝的扩展问题，见图 2(b)。由于硬币形裂缝问题的解答较为成熟，且可以作为特殊情况解答的基础和参照，因此按照从后向前的顺序，对每个阶段涉及到的应力强度因子的计算问题进行分析，得出各个阶段对应的裂缝的扩展条件。

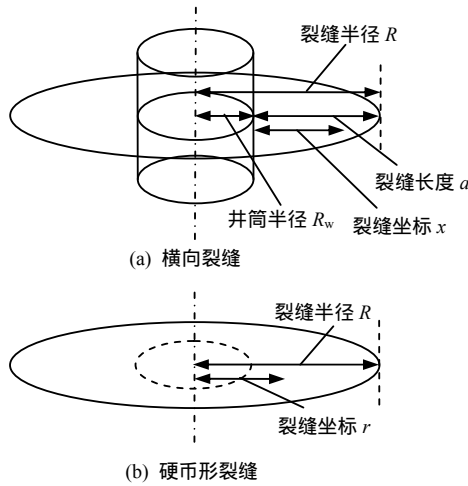


图 2 横向裂缝和硬币形裂缝

Fig.2 Transverse crack and penny-shaped crack

2.2 无限大介质中的硬币形裂缝

硬币形裂缝是无限介质中的轴对称圆形裂缝 (见图 2(b)),在缝内液体压力和远场法向压应力的共同作用下扩展,其应力强度因子的计算公式^[13]为

$$K_* = \frac{2}{\sqrt{\pi R}} \int_0^R \frac{p_n(r)}{\sqrt{R^2 - r^2}} r dr \quad (1)$$

式中: r 为沿裂缝径向的坐标; R 为裂缝半径; $p_n(r)$ 为裂缝内流体的净压力,等于缝内流体压力与远场法向压应力的差值。

对于均布净压力 p_n , 式 (1) 简化为

$$K_* = 2p_n \sqrt{R/\pi} \quad (2)$$

由裂缝的扩展准则^[14]:

$$K_* = K_c \quad (3)$$

式中: K_c 为 I 型断裂的断裂韧度。

用净压力表示的裂缝扩展准则为

$$p_n = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{R}} K_c \quad (4)$$

2.3 考虑井筒效应的横向裂缝

当井筒的半径与水力裂缝的长度在同一尺度时,应力强度因子的计算需考虑井筒的影响,计算式^[15]为

$$K = 2\sqrt{\frac{a}{\pi}} \int_0^c K_{np}(\xi, c) p_n(\xi) d\xi \quad (5)$$

式中:

$$\xi = \frac{x}{R_w}; \quad c = \frac{a}{R_w} \quad (6)$$

$$K_{np}(\xi, c) = \left(\frac{\xi+1}{c+1} \right) \left[1 + 0.3 \left(1 - \frac{\xi}{c} \right) \left(\frac{1}{1+c} \right)^4 \right] \frac{1}{\sqrt{c^2 - \xi^2}} \quad (7)$$

式中: $K_{np}(\xi, c)$ 为权函数,与含裂纹体的几何形状有关; x 为裂缝坐标,从井壁处开始计算; R_w 为井筒半径; a 为裂缝长度。

当缝内净压力均匀分布时,式 (5) 简化为

$$K = f(c) K_* \quad (8)$$

式中:

$$f(c) = \frac{2(1+c)^4(2c+\pi) + 0.3(c(4-\pi) + 2\pi - 4)}{4(1+c)^5} \sqrt{\frac{c}{1+c}} \quad (9)$$

绘制 K/K_* 随 c 变化的曲线,横坐标选用对数坐标,如图 3 所示。当 $c \geq 4$ 时, $K/K_* \approx 1$,此时可以忽略井筒的存在对应力强度因子的影响,将裂缝视为硬币形裂缝。

由式 (8) 可得考虑井筒效应的横向裂缝的扩展准则:

$$p_n = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{R}} \frac{K_c}{f(c)} \quad (10)$$

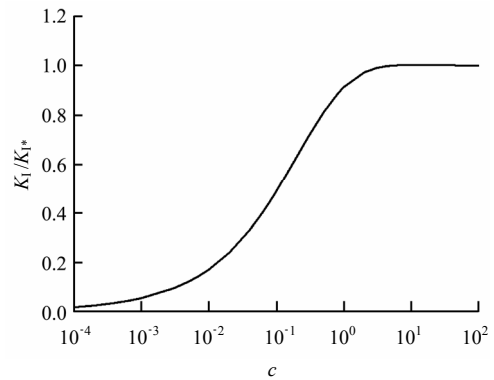


图 3 K_I/K_{I*} 曲线

Fig.3 Curve of K_I/K_{I*}

2.4 预制横缝的半圆形尖端对应力强度因子的影响

2.4.1 裂缝在预制横缝端部起裂

当预制横缝的端部简化为半圆形时,其端部将不存在应力奇异性(应力强度因子为 0),不能用式 (3) 作为起裂判据。此时,需考察预制横缝端部的应力分布,用最大拉应力准则作为起裂判据(见式 (11))。GREAGER 等^[16]给出了预制横缝端部前方的正应力分布,如图 4 所示。

$$\sigma(x) = \frac{2K(L)}{\sqrt{\pi(\rho+2x)}} \frac{\rho+x}{\rho+2x} \quad (11)$$

式中： x 为距离坐标，起点设在预制横缝的端部； ρ 为预制横缝端部的半径； L 为预制横缝长度； $K_I(L)$ 为相同加载条件下长度为 L 的横向裂缝的应力强度因子，可由式 (8) 求得。具体形式为

$$K(L) = f(c)K_*(R_w + L) = 2p_n \cdot \sqrt{\frac{L}{\pi} \left(\frac{2(1+c)^4(2c+\pi) + 0.3(c(4-\pi) + 2\pi - 4)}{4(1+c)^5} \right)} \quad (12)$$

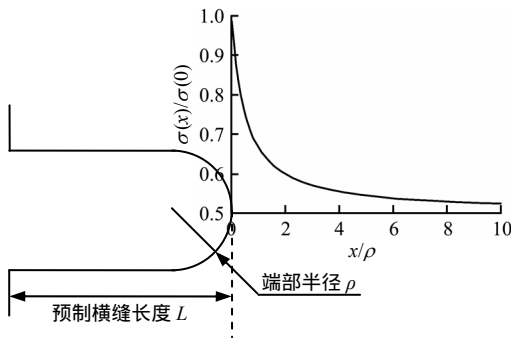


图 4 槽口半圆形端部处的正应力分布
Fig.4 Normal stress distribution at the tip of a semi-circular notch

根据最大拉应力准则，当预制横缝端部的最大拉应力超过材料的抗拉强度时裂缝在预制横缝端部起裂，预制横缝端部的最大拉应力为

$$\sigma(0) = \frac{2K(L)}{\sqrt{\pi\rho}} \quad (13)$$

令

$$\sigma(0) = \sigma_t \quad (14)$$

同时，将式 (13) 代入式 (14)，得到预制横缝端部裂缝的起裂净压力为：

$$p_{ni} = \pi \sqrt{\frac{\rho}{L} \frac{(1+c)^5}{2(1+c)^4(2c+\pi) + 0.3(c(4-\pi) + 2\pi - 4)}} \sigma_t \quad (15)$$

式中： σ_t 为材料的抗拉强度。

2.4.2 裂缝在预制横缝附近的扩展

裂缝在预制横缝附近扩展过程中的应力强度因子^[17]：

$$\frac{K_n}{K} \cong \tanh \left[2.243g_n \left(\frac{a}{\rho} \right) \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right] \quad (16)$$

式中：

$$g_n \left(\frac{a}{\rho} \right) \cong \frac{2}{3} + 0.178 \left[1 - \exp \left(-1.64 \frac{a}{\rho} \right) \right] \quad (17)$$

式中： K_n 为预制横缝附近裂缝的应力强度因子； K_I 为相同加载条件下长度为 $L+a$ 的横向裂缝的应力强度因子，可由式 (8) 计算得到； a 为预制横缝端部前方的裂缝长度； \tanh 为双曲正切函数。

K_n/K_I 随 a/ρ 的变化曲线如图 5 所示。当 $a/\rho=1$ 时， $K_n/K_I=0.95$ ，可以认为当裂缝的长度大于预制横缝半圆形端部的半径时，将槽口长度和裂缝长度合起来，整体作为一条横向裂缝来对待。

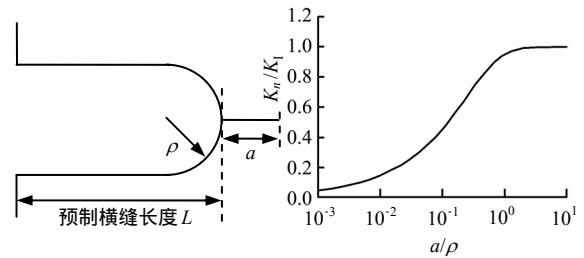


图 5 K_n/K_I 曲线
Fig.5 Curve of K_n/K_I

2.5 横向裂缝起裂与扩展的全过程

通过前面的分析，给出了裂缝从预制横缝的半圆形端部起裂，到逐渐扩展远离的全过程应力强度因子的计算方法，进一步结合最大拉应力准则和线弹性断裂力学中的裂缝扩展准则，可以建立全过程的裂缝起裂与扩展准则，如图 6 所示。

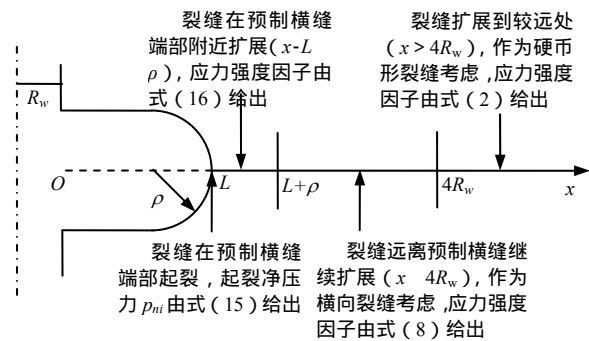


图 6 裂缝起裂扩展全过程应力强度因子的计算示意图
Fig.6 Sketch of calculation of SIFs during the whole process of fracture initiation and propagation

3 室内水力压裂试验

3.1 试验设计

在实验室条件下，利用人工制备试样开展了预制横向裂缝的水力压裂试验，试验系统的介绍见文献[18-20]。

人工制备试样的形状为长方体，尺寸为 300 mm×300 mm×600 mm，由水泥和石英砂按 1:4 的比例加水拌匀后倒入模具中浇筑而成，成型的试样见图 7。

利用外径为 25 mm 的钻头在 300 mm×300 mm 的平面中心沿长度方向将试样钻穿，作为井筒。在井筒中间位置利用自制的环向造缝装置形成一预制横缝，预制横缝近似呈圆环形，径向长度约为 7.5 mm，宽约 1 mm，井筒左右两端用钢套管和胶水封堵，在预制横缝左右各留有 10 mm 的裸眼段，裸眼段总长为 20 mm。井筒的布置细节如图 8 所示，共制备 6 组试样用于试验，试样编号分别为 N-1 ~ N-6。

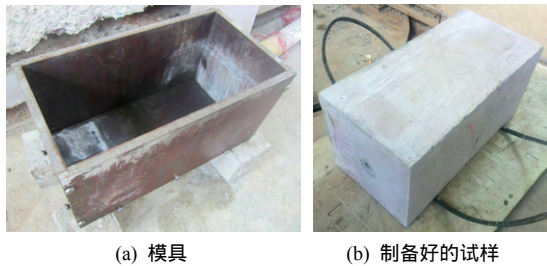


图 7 模具和制备好的试样
Fig.7 The mould and a prepared specimen

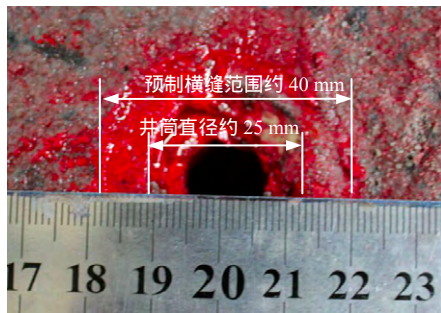
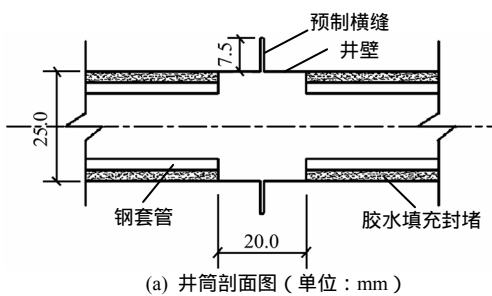


图 8 井筒布置
Fig.8 Configuration of the wellbore

试验开始时，在试样的前后面施加水平最小主应力 σ_h ，左右面施加水平最大主应力 σ_H ，上下面施加垂向应力 σ_v ，三向应力的加载方式见图 9。待三向应力加载完成，利用水力压裂泵向井筒内按设定排量注入压裂液，直至将试样压破。试验中，三向应力 σ_v 、 σ_H 、 σ_h 的取值分别为 5.8、6.3、4.9 MPa，压裂液黏度为 90 mPa·s，试样 N-1、N-2 的排量设定为 0.5 mL/s，试样 N-3 ~ N-6 的排量设定为 0.1 mL/s，压裂液中加入红色示踪剂，以便观察压后裂缝形态。试验参数的取值见表 1。

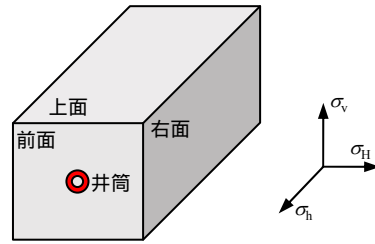


图 9 三向应力加载示意图
Fig.9 Loading sketch of tri-axial stresses

表 1 水力压裂试验参数
Table 1 Parameters of the hydraulic fracturing test

试样编号	三向应力/MPa	黏度/(mPa·s)	排量/(mL/s)
N-1		90	0.5
N-2	$\sigma_v = 5.8$	90	0.5
N-3	$\sigma_v = 6.3$	90	0.1
N-4	$\sigma_v = 4.9$	90	0.1
N-5		90	0.1
N-6		90	0.1

3.2 水力裂缝形态分析

选取试样 N-2 对压裂后形成的水力裂缝形态进行描述和分析。压裂试验后取出试样，在试样的上面和左面观察到明显的表面裂缝，裂缝走向与井筒轴线方向大致垂直，其余两个表面（下面和右面）未观察到表面裂缝。沿着表面裂缝将试样剖开，得到完整水力裂缝面，裂缝面大体呈一个平面展布，裂缝边界围成的形状近似一个圆形，起裂位置在预制横缝的端部。水力裂缝最先到达试样的上面和左面边界，压裂液流出试样表面。水力裂缝形态见图 10。

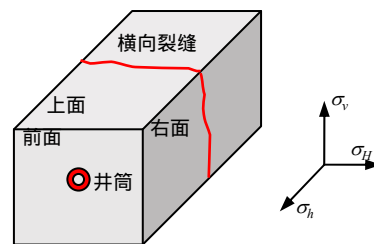


图 10 试样 N-2 典型水力裂缝形态
Fig.10 Typical geometry of hydraulic fracture of sample N-2

由此可知，水力裂缝在预制横缝端部起裂，沿着与井筒轴线垂直的平面扩展，形成一条横向水力裂缝，裂缝的扩展呈现出型断裂的特点，其余 5 个试样也均形成了垂直井筒轴线的横向水力裂缝。

所有试样未发现与井筒轴线平行的纵向裂缝的起裂和扩展，因此设想可否选择高角度天然裂缝发育的位置射孔压裂，可能有利于改善近井复杂的裂缝形态（避免同时形成纵横向裂缝，以及纵向裂缝起裂后的转向扭曲），使得缝口宽度增大，近井摩擦阻损失减小，更有利于裂缝沿长度方向的充分扩展，激活更多的天然裂缝，增大储层改造体积。

3.3 裂缝起裂净压力分析

在室内水力压裂试验以及现场压裂施工中可以得到井筒内的流体压力随时间变化的曲线，即泵压曲线。泵压曲线中包含裂缝克服远场压应力的成分，为排除远场地应力差异的影响，专注于分析介质本身属性对裂缝扩展的影响，将泵压曲线减去垂直于裂缝优势扩展方向的远场压应力（在水平井条件下，此远场压应力即水平最小主应力），由此而得到的曲线定义为净压力-时间曲线。

破裂净压力 p_{nb} 是净压力与时间曲线的峰值点所对应的净压力，起裂净压力 p_{ni} 是裂缝起裂时对应的净压力。水力裂缝起裂前，随着流体的不断注入，井筒内的压力不断增大，压力的增长速率处于不断上升的过程，裂缝起裂时产生了新的空间，压力的增长速率将出现降落，因此可以通过寻找压力增长速率的最大值对应的压力作为起裂净压力，确定起裂净压力的方法如图 11 所示，以试样 N-1 为例，将净压力-时间曲线和净压力对时间的导数曲线置于同一坐标轴中，找到导数曲线的最高点，同一时间点对应的净压力即为起裂净压力。

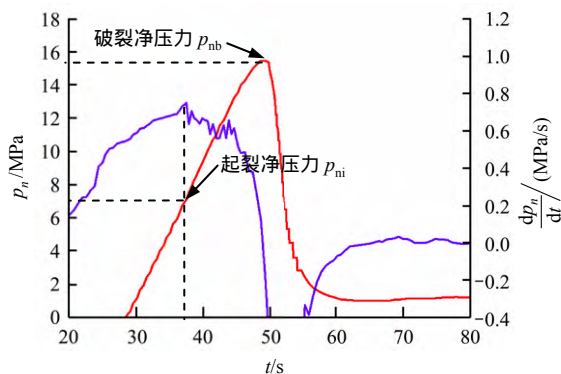


图 11 试样 N-1 净压力与时间曲线中破裂净压力和起裂净压力的识别

Fig.11 Recognition of breakdown and initiation net pressure in net pressure vs. time curves of sample N-1

4 组试样的破裂净压力、起裂净压力见表 2。采用大排量（0.5 mL/s）的试样（N-1、N-2）的破裂净压力、起裂净压力均高于采用小排量（0.1 mL/s）的试样（N-3~N-6）。由此可知，排量（实质为加载速率）对水力裂缝的破裂净压力、起裂净压力有重要影响，大排量会导致较高的破裂净压力和起裂净压力。破裂净压力的离散性（大排量变异系数为 0.173，小排量变异系数为 0.153）比起裂净压力的离散性（大排量变异系数为 0.064，小排量变异系数为 0.090）大，这可能是由于裂缝起裂范围限制在预制横缝端部，状态相对稳定，而压力达到破裂净压力时水力裂缝已经在预制横缝附近有了一定扩展，并且不一定呈径向同步外扩的理想状态，情况相对复杂，导致破裂净压力离散性较高。

表 2 起裂净压力及 K_I 临界断裂值
Table 2 Initiation net pressures and the critical fracturing values K_I

试样编号	破裂净压力 p_{nb}/MPa	起裂净压力 p_{ni}/MPa	断裂临界值 $K_I/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$
N-1	15.21	7.26	0.98
N-2	11.89	7.95	1.07
均值/变异系数	13.55/0.173	7.61/0.064	1.03/0.062
N-3	9.73	5.67	0.75
N-4	7.43	5.79	0.78
N-5	10.64	6.60	0.89
N-6	10.36	5.36	0.72
均值/变异系数	9.54/0.153	5.86/0.090	0.79/0.094

将预制横缝视为横向裂缝，假设缝内的流体净压力均匀分布，利用试验中得到的起裂净压力，代入式（10）得到人工制备试样在本研究模型中的 K_I 临界断裂值（见表 2）。由表可知，人工制备试样在大排量下的平均断裂临界值为 $1.03 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ，大于在小排量下的平均断裂临界值 $0.79 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ，断裂临界值受排量的影响较大；在大、小两种排量下断裂临界值的离散性均较小（变异系数分别为 0.062 和 0.094）。

4 结 论

（1）裂缝自预制横缝端部起裂后扩展距离超过 1 倍的预制横缝端部半径时，可将预制横缝和水力裂缝合并起来，整体视作一条横向裂缝来计算应力强度因子。裂缝尖端距井壁处的距离大于 4 倍的井筒半径时，应力强度因子的计算可忽略井筒的影响，近似采用硬币形裂缝的计算公式。

（2）在预制横缝试样的水力压裂试验中，水力裂缝在预制横缝端部起裂并扩展，形成与井筒轴线

垂直的横向裂缝, 裂缝的扩展呈现出型断裂的特点, 形态近似呈圆形, 未发现与井筒轴线平行的纵向裂缝。

(3) 排量对破裂净压力和起裂净压力有重要影响, 大排量会导致较高的破裂净压力和起裂净压力。在大、小两种排量下起裂净压力的离散性均较小, 计算得到的 K 临界断裂值的离散性也较小。

参 考 文 献

- [1] 肖刚, 唐颖. 页岩气及其勘探开发[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
XIAO Gang, TANG Ying. Shale gas and its exploration and development[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012.
- [2] DANESHY A. Horizontal-well fracturing: Why is it so different?[J]. **Journal of Petroleum Technology**, 2015, 61: 28 - 35.
- [3] EMANUELE M A, MINNER W A, WEIJERS L, et al. A case history: completion and stimulation of horizontal wells with multiple transverse hydraulic fractures in the lost hills diatomite[C]//SPE Rocky Mountain Regional/Low-Permeability Reservoirs Symposium. Denver: Society of Petroleum Engineers, 1998.
- [4] RABAA W E. Experimental study of hydraulic fracture geometry initiated from horizontal wells[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio, Texas:[s.n.], 1989.
- [5] ABASS H H, HEDAYATI S, MEADOWS D L, et al. Nonplanar fracture propagation from a horizontal wellbore: experimental study[J]. **SPE Production & Facilities**, 1996, 11(3): 133 - 137.
- [6] KETTERIJ R G, PATER C J D. Impact of perforations on hydraulic fracture tortuosity[J]. **SPE Production & Facilities**, 1999, 14(2): 117 - 130.
- [7] WARPINSKI N R, TEUFEL L W. Influence of geologic discontinuities on hydraulic fracture propagation[J]. **Journal of Petroleum Technology**, 1984, 39(2): 209 - 220.
- [8] POTLURI N K, ZHU D, HILL A D. The effect of natural fractures on hydraulic fracture propagation[C]//SPE European Formation Damage Conference. Sheveningen: Society of Petroleum Engineers, 2005.
- [9] 周健, 陈勉, 金衍, 等. 压裂中天然裂缝剪切破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 1): 2637 - 2641.
ZHOU Jian, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Mechanism study of shearing slippage damage of natural fracture in hydraulic fracturing[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(Supp.1): 2637 - 2641.
- [10] 陈勉. 页岩气储层水力裂缝转向扩展机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(5): 88 - 94.
CHEN Mian. Re-orientation and propagation of hydraulic fractures in shale gas reservoir[J]. **Journal of China University of Petroleum(Natural Science)**, 2013, 37(5): 88 - 94.
- [11] 程万, 金衍, 陈勉, 等. 三维空间中水力裂缝穿透天然裂缝的判别准则[J]. 石油勘探与开发, 2014, 3(3): 336 - 340.
CHENG Wan, JIN Yan, CHEN Mian, et al. A criterion for identifying hydraulic fractures crossing natural fractures in 3D space[J]. **Petroleum Exploration and Development**, 2014, 3(3): 336 - 340.
- [12] 冯彦军, 康红普. 定向水力压裂控制煤矿坚硬难垮顶板试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1148 - 1155.
FENG Yan-jun, KANG Hong-pu. Test on hard and stable roof control by means of directional hydraulic fracturing in coal mine[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(6): 1148 - 1155.
- [13] RICE J R. Mathematical analysis in the mechanics of fracture[J]. **Fracture**, 1968, 2: 191 - 311.
- [14] ANDERSON T L. Fracture mechanics: fundamentals and applications[M]. London: Taylor & Francis, 2005.
- [15] NILSON R H, PROFFER W J. Engineering formulas for fractures emanating from cylindrical and spherical holes[J]. **Journal of Applied Mechanics**, 1984, 51(4): 929 - 933.
- [16] CREAGER M, PARIS P C. Elastic field equations for blunt cracks with reference to stress corrosion cracking[J]. **International Journal of Fracture Mechanics**, 1967, 3(4): 247 - 252.
- [17] FETT T. Estimated stress intensity factors for semi-elliptical cracks in front of narrow circular notches[J]. **Engineering Fracture Mechanics**, 1999, 64(3): 357 - 362.
- [18] 郭印同, 杨春和, 贾长贵, 等. 页岩水力压裂物理模拟与裂缝表征方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 52 - 59.
GUO Yin-tong, YANG Chun-he, JIA Chang-gui, et al. Research on hydraulic fracturing physical simulation of shale and fracture characterization methods[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(1): 52 - 59.
- [19] 衡帅, 杨春和, 曾义金, 等. 页岩水力压裂裂缝形态的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(7): 1243 - 1251.
HENG Shuai, YANG Chun-he, ZENG Yi-jin, et al. Experimental study on hydraulic fracture geometry of shale[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(7): 1243 - 1251.
- [20] 侯振坤, 杨春和, 王磊, 等. 大尺寸真三轴页岩水平井水力压裂物理模拟试验与裂缝延伸规律分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 407 - 414.
HOU Zhen-kun, YANG Chun-he, WANG Lei, et al. Hydraulic fracture propagation of shale horizontal well by large-scale true triaxial physical simulation test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(2): 407 - 414.